Difusión

Contenido

1. Introducción 1
2. Difusión 2
3. Reglas Hume-Rothery 4
4. Mecanismo de difusión sustitucional 4
5. Mecanismo de difusión intersticial 7
6. Difusión en estado estacionario 9
7. Difusión en estado no estacionario 11
8. Efecto de la temperatura en la difusión 14
9. Aplicaciones industriales 16
10. Referencias 20

1. Introducción

A lo largo de la historia, la fabricación de herramientas a partir de ciertos materiales ha sido vital para nuestra supervivencia y progreso. Sin embargo, con el paso de los años las necesidades de la sociedad han impulsado que estos materiales sean estudiados, al igual que los compuestos o aleaciones que se pueden generar con la unión de dos o más materiales, esto en una constante búsqueda de propiedades que puedan satisfacer nuestros requerimientos de uso como la dureza, resistencia, ductilidad, entre otros.

Actualmente disponemos de una gran variedad de materiales aprovechables en la ingeniería, cada uno con propiedades y procesos de obtención específicas. Uno de los factores que intervienen en las diferentes características de los materiales es el fenómeno de **difusión**, proceso en el cual se transporta la materia por el movimiento de los átomos que se puede dar de forma natural o inducida a través de ciertos mecanismos. En este proyecto se expondrán los mecanismos de difusión, las matemáticas detrás de ella, así como los agentes variables que la afectan y aplicaciones en el campo industrial.

2. Difusión

La difusión es un proceso natural muy común en el que los átomos de un material se transportan a través de otro material. Este proceso se da gradualmente y de manera que las partículas puedan pasar de una región con alta concentración de la materia a una región con menor concentración. La mezcla y dispersión del proceso difusivo se puede apreciar muy claramente al introducir una gota de colorante azul en un vaso de agua, la cual se tornará de color azul eventualmente debido a lo que hemos mencionado, esto puede observarse en la Figura 1: hay una tendencia de la materia a moverse a áreas con menor concentración cuando la composición difiere, de esa forma la difusión es el proceso por el cual el gradiente de concentración es eliminado [1–5].

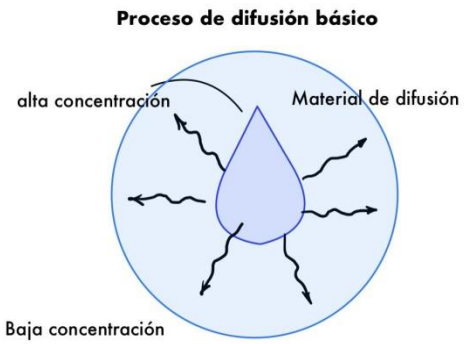

Figura 1. Proceso difusivo de una gota con alta concentración de colorante hacia zonas con menor concentración.

Es importante mencionar que esto es en el caso de mezclas solubles, para otros casos, por ejemplo el agua y el aceite no hay difusión entre ellos, la polaridad del agua y la apolaridad del aceite provocan este fenómeno de mezcla heterogénea.

Los procesos difusivos pueden darse en los tres estados de la materia comúnmente conocidos: gases, líquidos y sólidos; por otro lado, la materia que se transporta puede darse en diferentes presentaciones: iones, átomos, electrones y moléculas. Un ejemplo particular de los gases es cuando las partículas correspondientes al olor de comida provenientes de la cocina se esparcen a otras habitaciones tratando de lograr una dispersión uniforme.

Cuando se trata de una aleación o solución sólida, el proceso difusivo es una de las maneras que tienen los átomos de estabilizarse o bien, llegar al estado de equilibrio. En el momento que el potencial químico es el mismo en cada uno de los átomos del

sistema, la difusión se detiene. Entendemos una solución sólida como un sólido compuesto de dos o más elementos, organizados atómicamente de manera que forman una sola estructura.

El fenómeno de difusión implica que la dirección de transferencia de materia logre igualar la concentración en las regiones de estudio, para lograrlo se apoya de la segunda ley de la termodinámica, la desigualdad de Clausius. El movimiento de especies de una región con baja concentración a una de alta concentración no es factible, ya que no todo el calor se puede convertir en trabajo sin que haya una fracción de calor que se rechace al medio ambiente, análogamente en la difusión no es posible lograr el movimiento de especies de bajas concentraciones a regiones de altas concentraciones sin aplicar una fuerza externa para compensar la diferencia de energía posterior a la difusión natural. Asimismo, el calor siempre fluye de una región caliente a una región fría, aplicado en nuestro caso: las especies molares tienen un comportamiento similar, se mueven de regiones con alto potencial químico a regiones con menor potencial químico.

Nosotros nos enfocaremos a los sólidos, en donde existe una fuerza muy grande entre los enlaces de los átomos, a diferencia de los estados gaseoso y líquido en los que el movimiento de los átomos es relativamente rápido. La fuerza entre los enlaces de los sólidos limita el movimiento de los átomos de tal forma que para lograr el movimiento de algunos átomos se deben tomar en cuenta las vibraciones térmicas.

El mecanismo de difusión en sólidos tiene dos variantes principalmente: el mecanismo de difusión por vacantes o sustitucional y el mecanismo de difusión por sitios intersticiales, ambos se muestran en la *Figura 2*.

Los factores más importantes a considerar en la difusión comprenden a los enlaces atómicos, el tamaño del átomo que se desplazan en comparación con los átomos de la materia donde se van a difundir, la temperatura, etcétera.

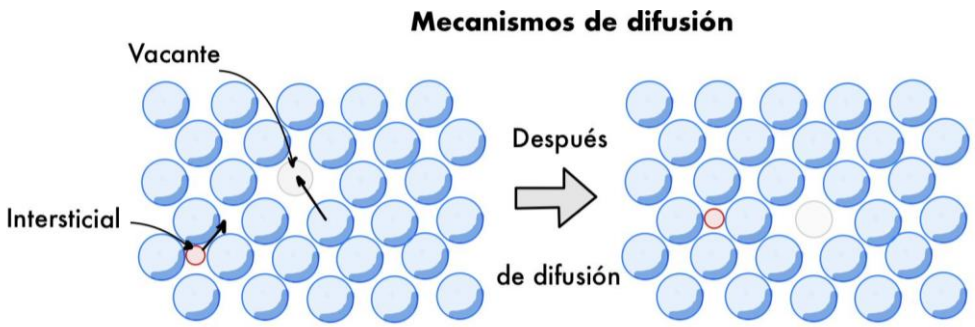

Figura 2 Mecanismos de difusión en estructuras atómicas de soluciones sólidas.

3. Reglas Hume-Rothery

Para que un sistema tenga solubilidad ilimitada en estado sólido, o bien pueda presentar una estructura homogénea posteriormente del proceso de difusión, debe cumplir con las 4 reglas de Hume-Rothery [2,6]:

1. El radio atómico del soluto y del disolvente no deben diferir más del 15%. Para comprender mejor esta diferencia haremos uso de la ecuación (1).

$$\%dif = \frac{r_{soluto} - r_{dsol}}{r_{dsol}} * 100 \leq 15\% \qquad (1)$$

r_{sol}: radio del soluto

r_{dsol}:radio del disolvente

2. Ambas estructuras cristalinas deben ser similares.
3. Deben tener la misma valencia. La diferencia de valencias impulsa a la formación de compuestos y no de soluciones.
4. Electronegatividad similar. Si las electronegatividades son significativamente distintas se forman compuestos.

4. Mecanismo de difusión sustitucional

Para el proceso de difusión sustitucional que se muestra en la Figura 3, se considera que dentro de la estructura atómica del solvente puede haber sitios vacantes en los que el átomo que se desea difundir se puede incorporar. Con la finalidad de realizar el movimiento entre las redes cristalinas desde una posición atómica a otra debe tenerse la energía de activación, misma que se obtiene a partir de vibraciones térmicas de los átomos [2].

En el caso de los metales y aleaciones las vacantes que se toman en cuenta suelen ser defectos de estructura, de esta manera, siempre da lugar a la difusión sustitucional de los átomos.

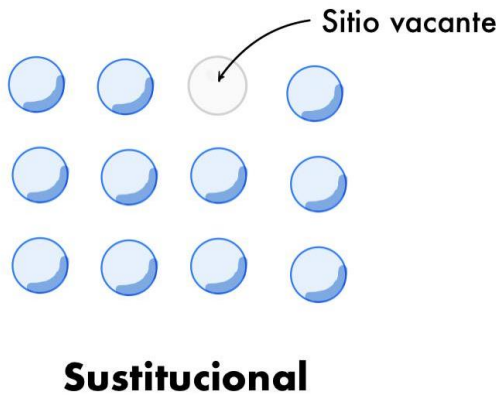

Figura 3 Sitio vacante en una estructura atómica donde un átomo difusivo podría incorporarse.

Si el mecanismo sustitucional no cumple con la primera Ley de Hume Rothery se pueden tener dos casos [2,6]:

1. El átomo de soluto es de mayor tamaño que los átomos del solvente, distorsionando la estructura.
2. El átomo de soluto es más pequeño que los átomos del solvente, adoptando características intersticiales y provocando contracciones en la estructura.

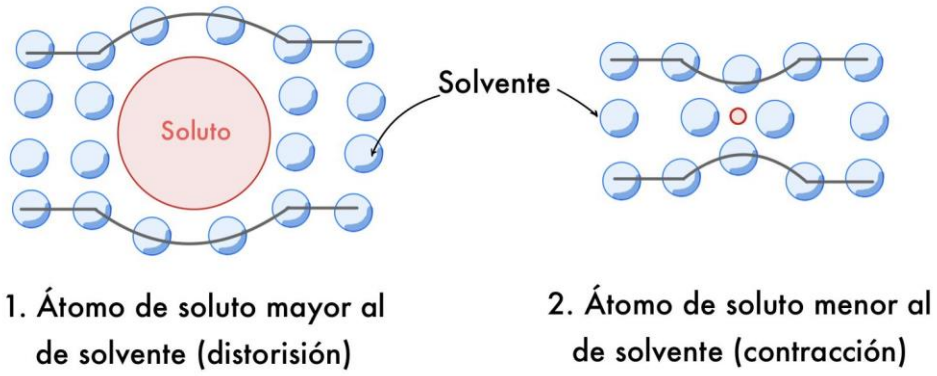

Figura 4. Casos de la difusión sustitucional cuando no se cumple la primera ley de Hume Rothery.

Naturalmente, el movimiento de los átomos sustitucionales está limitado por los átomos que le rodean, razón por la cual no se desplaza con facilidad. Para que un átomo próximo a la vacante sustitucional pueda moverse hasta la posición vacante debe tener suficiente energía de activación.

La frecuencia media de la energía vibracional de cada átomo es aproximadamente constante, de tal manera que, esta energía incrementa si incrementamos la amplitud de las oscilaciones. Si la vacante se encuentra en un sitio vecino inmediato es posible

que el átomo realice el salto si ocurre una oscilación violenta de la energía, esto se muestra en la *Figura 5*. Es importante resaltar que los átomos que se aprecian sombreados en la imagen deberán moverse para permitir el paso del átomo sustitucional, el átomo no sólo se tiene que afrontar a su propio movimiento, sino que debe tener energía suficiente para desplazar temporalmente a los átomos que le rodean.

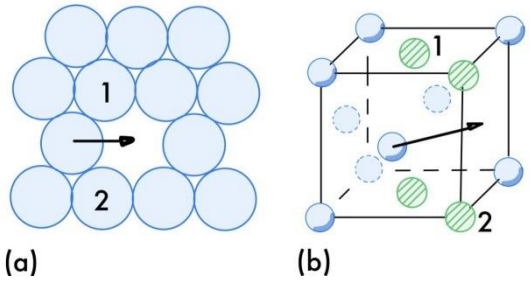

Figura 5. Movimiento de un átomo a un sitio vacante adyacente en una estructura FCC (Cúbica Centrada en las Caras), a) Plano compacto, b) Celda unitaria que muestra los cuatro átomos (sombreados) que tienen que moverse para que el salto del átomo ocurra.

Un caso particular de difusión sustitucional se presenta en los metales puros, donde los átomos que conforman la red cristalina de un elemento A pueden intercambiar posiciones. Como se muestra en la *Figura 6*, un átomo puede moverse a una vacante cercana si posee la suficiente energía de activación, contribuyendo a la **autodifusión** de los átomos de A en la red.

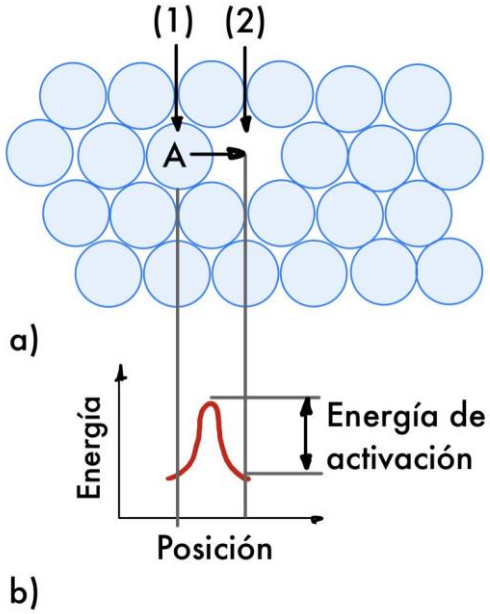

Figura 6. a) Plano compacto con un sitio vacante
b) Gráfica de la energía requerida para realizar el salto de la posición (1) a (2).

En la Tabla 1 se presentan algunas energías de autodifusión en metales puros[2], las cuales son resultado de la suma de la energía de activación para la formación de la vacante y la energía de activación para mover la vacante. Es preciso señalar que al aumentar la temperatura de fusión del metal también aumenta la energía de activación, esto debido a que los metales de mayor temperatura de fusión poseen elevadas energías de enlace entre sus átomos.

Tabla 1. Energías de activación de autodifusión para algunos metales puros.

Metal	Puntos de fusión, °C	Estructura cristalina	Rango de temperatura estudiado, °C	Energía de activación [kJ/mol]	Energía de activación [kcal/mol]
Cinc	419	HCP	240-418	91.6	21.9
Aluminio	560	FCC	400-610	165	39.5
Cobre	1083	FCC	700-990	196	46.9
Níquel	1452	FCC	900-1200	293	70.1
Hierro	1530	BCC	808-884	240	57.5
Molibdeno	2600	BCC	2155-2540	460	110

5. Mecanismo de difusión intersticial

El mecanismo de difusión intersticial implica que los átomos de soluto se desplazaran a sitios conocidos como intersticiales, los sitios intersticiales son los espacios que hay en la red cristalina de los átomos del solvente y por lo regular están libres, por lo tanto, la tasa de difusión intersticial tiene a ser mayor que la tasa de difusión por sitios vacantes [2,5]. Cuando el átomo de soluto se puede desplazar a un sitio intersticial y no a un sitio vacante de la red cristalina se considera difusión intersticial. Para lograr la difusión intersticial el átomo de soluto debe ser considerablemente más pequeño que el del solvente para entrar en el sitio intersticial. El movimiento de una posición intersticial a otra que está desocupada se da sin el desplazamiento permanente de otros átomos de la red cristalina matriz. El proceso de difusión intersticial es rápido en

comparación con la difusión por vacantes por el menor tamaño de los átomos y su mayor facilidad para moverse [1].

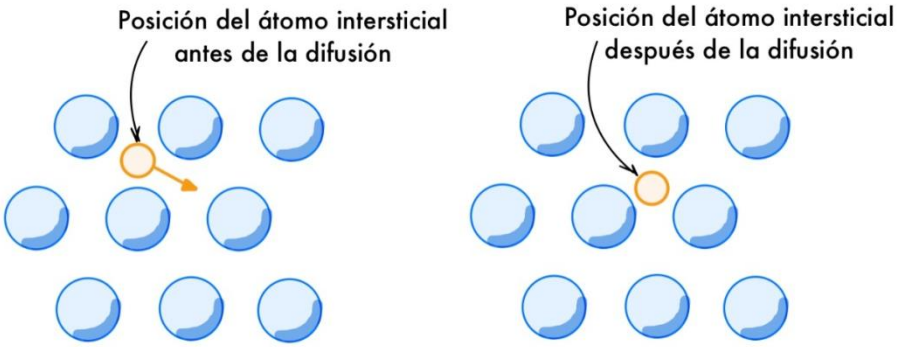

Figura 7. Movimiento de un átomo a un sitio intersticial adyacente.

En general, los átomos pequeños: hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y carbono se difunden intersticialmente en las redes cristalinas metálicas, un ejemplo muy conocido es el del carbono que se difunde intersticialmente en el hierro en su fase alfa con una estructura BCC (Cúbica Centrada en el Cuerpo) y también en el hierro en la fase gamma con estructura FCC; para estos casos los átomos de carbono se mueven entre los átomos de la matriz hierro para lograr el proceso difusivo. Cuando se trata de la estructura FCC, los átomos intersticiales se sitúan en la mitad de los bordes, o bien, en medio de la celda unitaria, estos átomos intersticiales se conocen como sitios octaédricos, ya que los seis átomos alrededor del sitio intersticial forma un octaedro. Por otro lado, en la estructura BCC también se forman sitios octaédricos, sin embargo, estos se ubican tanto en el centro como en los bordes de la estructura octaédrica, lo anterior se puede observar en la Figura 8.

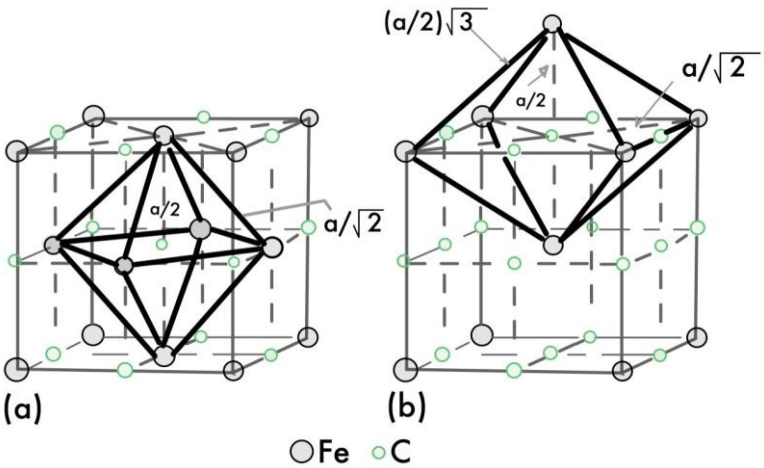

Figura 8. a) Sitios intersticiales octaédricos en un cristal FCC, b) Sitios intersticiales octaédricos en un cristal BCC

La difusión intersticial se ve afectada por los cambios de temperatura aunque no de la misma manera que la difusión por vacantes. La difusividad del proceso por vacantes está estrechamente relacionada con el aumento de la temperatura porque esto genera una mayor cantidad de vacantes, por otro lado, el aumento de difusividad en el caso del proceso intersticial se debe al aumento de la energía de los átomos, facilitando el cambio de posición. Asimismo, es más probable el proceso intersticial que el proceso por vacantes ya que generalmente a una misma temperatura hay más espacios intersticiales vacíos en la red cristalina que espacios vacantes. Este tema se explora más a fondo en el apartado de **Efecto de la temperatura en la difusión,** una vez que se hayan explorado los temas subsecuentes a este es más factible la comprensión de la temperatura como factor decisivo en los procesos difusivos.

6. Difusión en estado estacionario

Para niveles macroscópicos consideramos que el proceso de difusión es dependiente del tiempo, pues se necesita conocer a qué velocidad ocurre la transferencia de masa de un elemento dentro del otro (Callister, 2007, 98). Esta velocidad, conocida como **flujo de difusión** (J), se expresa matemáticamente como se muestra en la ecuación (2).

$$J = \frac{1}{A}\frac{dM}{dt} \qquad (2)$$

Donde:

$J = Flujo\ de\ difusión\ [\frac{kg}{m^2 s}]$ ó $[\frac{átomos}{m^2 s}]$

$A = Área\ del\ sólido\ [m^2]$

$M = Masa\ o\ número\ de\ átomos\ difundidos\ [kg]$ ó $[átomos]$

$t = Tiempo\ de\ difusión\ [s]$

Cuando se habla de un estado estacionario, el flujo de difusión no cambia con el tiempo. Esto puede ejemplificarse con la Figura 9 donde se muestra la difusión de átomos de un gas a través de una lámina metálica, manteniéndose constantes las concentraciones (o presiones) de las sustancias que difunden en ambos lados de la lámina [6].

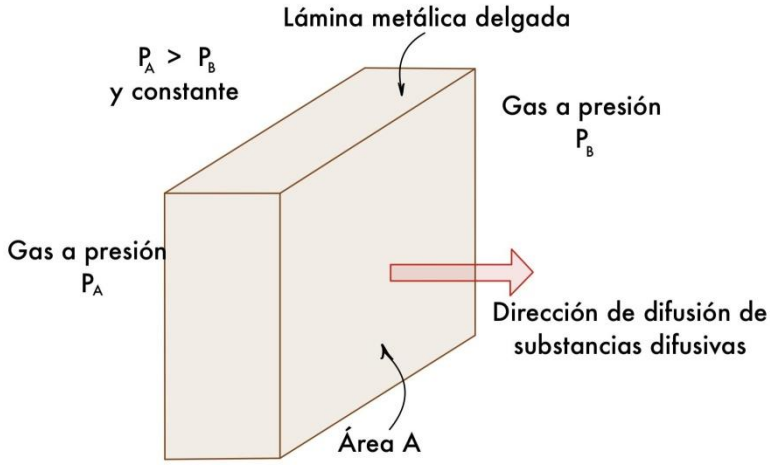

Figura 9. Difusión de átomos de un gas a través de una lámina metálica.

Con una diferencia de concentración en ambos lados de la lámina y sin interacción química entre sus átomos (solvente) y los átomos del gas (soluto), el flujo neto de átomos se dará desde la parte de concentración más alta hacia la parte de concentración más baja, por lo que la densidad de flujo J para sistemas de estado estacionario quedará representada por la ecuación (3).

$$J = -D_B \frac{dc_B}{dx} \qquad (3)$$

Donde:

$J = Flujo\ de\ difusión\ [\frac{kg}{m^2 s}]$ ó $[\frac{átomos}{m^2 s}]$

$D_B = Constante\ de\ difusión\ o\ Difusividad\ [\frac{m^2}{s}]$

$\frac{dC_B}{dx} = \frac{C_1 - C_2}{x_1 - x_2} = Gradientedeconcentración\ [\frac{átomos}{m^3} * \frac{1}{m}]$

El signo negativo de la expresión anterior, conocida como la **Primera Ley de Fick**, indica que la difusión se produce en dirección opuesta al gradiente de concentración

[2], el cual representa la pendiente al graficar la concentración (C) respecto a la posición dentro del sólido (x) , Figura 10.

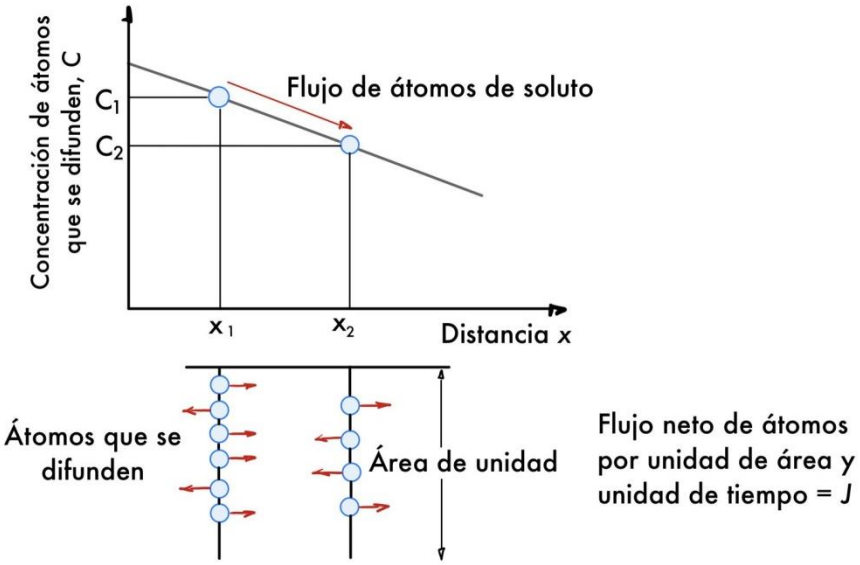

Figura 10. Gráfica concentración/posición para una difusión con saltos aleatorios dado un gradiente de concentración.

7. Difusión en estado no estacionario

En el ámbito práctico generalmente no se presentan casos de difusión en estado estacionario, pues la concentración del soluto, así como el gradiente y el flujo de difusión, varían con el tiempo de un punto a otro en el material, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden [6]. Para los eventos de difusión en estado no estacionario se aplica la ecuación (4), conocida como la **Segunda Ley de Fick**, la cual establece que la velocidad del cambio de composición es igual al coeficiente de difusión multiplicado por la velocidad de cambio del gradiente de concentración [2].

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx}\left(D_B \frac{dC_x}{dx}\right) \qquad (4)$$

En situaciones particulares, si se logra comprobar que el **coeficiente de difusión** (D_B) es independiente de la composición, podemos simplificar la ecuación (4) para que resulte en la ecuación (5).

$$\frac{dC_x}{dt} = D_B\left(\frac{d^2C_x}{d^2x}\right) \qquad (5)$$

A pesar de que nuestra ecuación de trabajo es una ecuación diferencial con soluciones infinitas, podemos obtener soluciones particulares partiendo de la Figura 11, donde se tiene un gas A que se difunde en un sólido B.

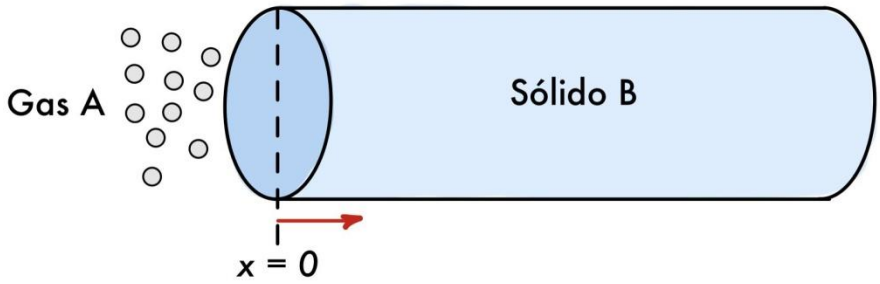

Figura 11. Difusión de un gas A en un sólido B.

La concentración de átomos del soluto A en cualquier punto del sólido B en la dirección x aumentará conforme avance el tiempo de difusión, como se indica para los tiempos t_1 y t_2 en la *Figura 12* por lo que la solución a la Segunda Ley de Fick se determina a partir de la ecuación (6) [2].

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad (6)$$

Donde:

$C_s = Concentración\ del\ gas\ en\ la\ superficie\ [\%]$

$C_x = Concentración\ del\ elemento\ a\ la\ distancia\ x\ \ en\ el\ tiempo t\ [\%]$

$C_0 = Concentración\ inicial\ uniforme\ del\ gas\ en\ el\ sólido\ [\%]$

$erf(z) = Función\ error$

$x = Distancia\ desde\ la\ superficie\ [cm^2]$

$D = Coeficiente\ de\ difusión \left[\frac{cm^2}{s}\right]$

$t = Tiempo\ de\ difusión\ [s]$

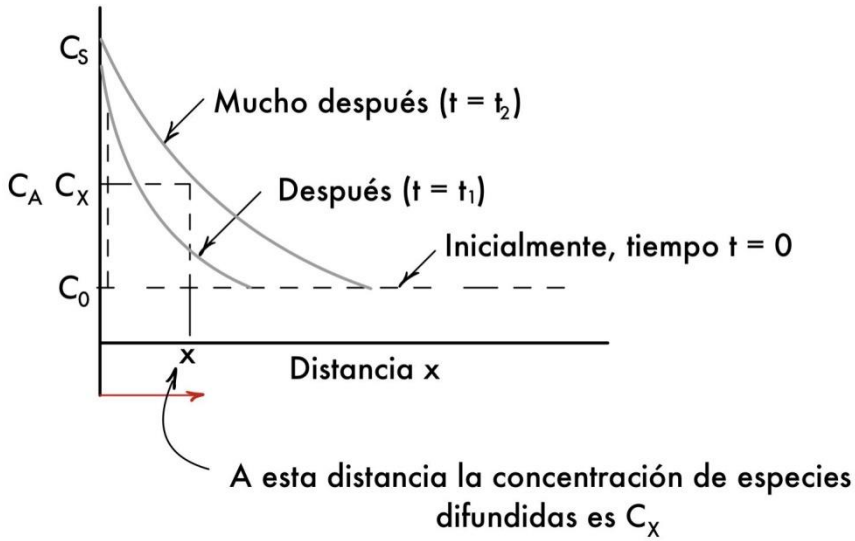

Figura 12. Aumento de la concentración de átomos de soluto en función del tiempo.

La función error (erf) es la función de error gaussiana, ver ecuación (7), y se utiliza en algunas soluciones de la Segunda Ley de Fick. Los resultados resumidos de esta función se pueden consultar en la *Tabla 2.*

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2}\, dy \qquad (7)$$

Donde *z* se puede definir como se muestra en la ecuación (8).

$$z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \qquad (8)$$

Tabla 2. Valores de la función error gaussiana aplicada a la Segunda Ley de Fick.

z	$erf(z)$	z	$erf(z)$	z	$erf(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6520	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993

0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

8. Efecto de la temperatura en la difusión

La difusión atómica implica el movimiento de átomos, se deduce que, al aumentar la temperatura de un sistema, aumenta respectivamente la velocidad de difusión. Este incremento en la velocidad, relacionado al aumento de la temperatura, puede ser representado para muchos sistemas de difusión con la ecuación (9).

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \qquad (9)$$

Donde:

D =$Capacidad\ de\ difusión\ [\frac{m^2}{s}]$.

$D_0 = Constante\ de\ proporcionalidad\ \left[\frac{m^2}{s}\right],\ independiente\ de\ la\ temperatura$

$en\ el\ intervalo\ en\ que\ la\ ecuación\ es\ válida.$

Q =$Energía\ de\ activación\ de\ las\ especies\ en\ difusión\ [\frac{J}{mol}]\ o\ [\frac{cal}{mol}]$.

$R = Constante\ molar\ de\ los\ gases = 8.314\ [\frac{J}{mol*K}] = 1.987\ [\frac{cal}{mol*K}]$.

$T = Temperatura\ absoluta\ [K]$.

Para el caso particular del proceso de difusión intersticial: como ya se ha visto, la energía térmica de los átomos de los sólidos provoca una vibración en su posición que si llega a coincidir con algún movimiento del material de la matriz por causa de una oscilación violenta puede implicar un salto de los átomos intersticiales. Por consiguiente, la capacidad de difusión está estrechamente relacionada con la frecuencia con la que se dan los saltos de los átomos intersticiales, a su vez esta frecuencia está condicionada por el aumento de temperatura del sistema.

Para que se dé el salto de un átomo intersticial a un sitio vecino inmediato debe haber un aumento de energía, esta energía se usa para superar las etapas del movimiento donde se requiere de mayor energía, ver *Figura 13*, la posición de reposo del átomo intersticial es una posición de mínima energía potencial.

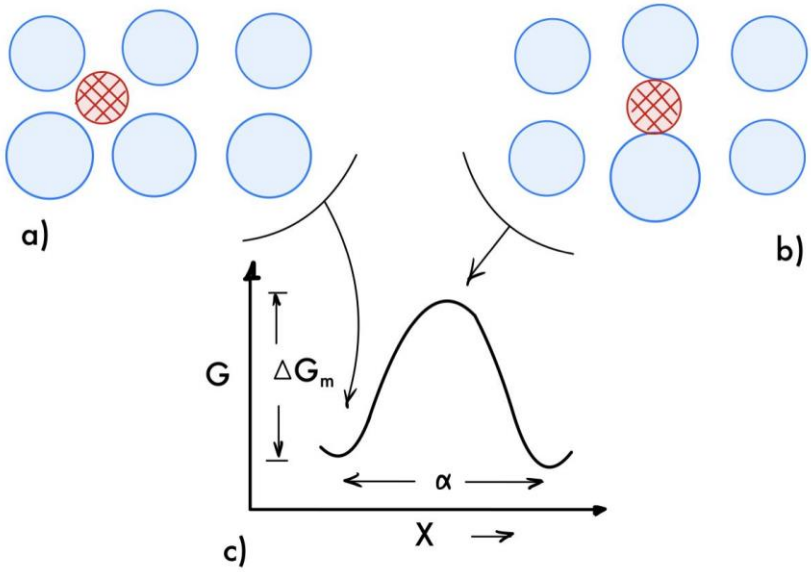

Figura 13. Variación de la energía en difusión intersticial. Se observa un incremento de energía para lograr el posicionamiento del átomo en un nuevo sitio intersticial vecino e inmediato.

El aumento de energía del que hablamos implica que la energía libre del sistema va a cambiar, ΔG_m, donde *m* implica un proceso de migración. Esta energía también es conocida como energía de activación para la migración del átomo intersticial. En consecuencia de que los átomos están constantemente chocando y por ende cambiando su energía vibracional se puede determinar la fracción de átomos que tienen la energía de activación necesaria o más de la necesaria auxiliándose de la expresión ($-\Delta G\ /\ RT$).

Ahora bien, si suponemos que nuestro átomo intersticial está vibrando a la frecuencia promedio *v* en la dirección *x,* implica que haya *v* intentos por segundo de saltos hacia algún sitio vecino inmediato y la fracción de esos saltos que sí se logran está determinada por la expresión exp($-\Delta G_m\ /\ RT$). Como el átomo está rodeado de *z* sitios intersticiales posibles, porque está en un espacio tridimensional,la frecuencia de los saltos (Γ_B) está dada por la ecuación (10)

$$\Gamma_B = zvexp\frac{-\Delta G_m}{RT} \qquad (10)$$

Si tomamos en cuenta que la energía de activación (ΔG_m) es la suma de una gran entalpía (ΔH_m) de activación y una pequeña entropía ($-T\Delta s_m$)

Y por otro lado, usando la ecuación (11)

$$D_B = \frac{1}{6}\Gamma_B\alpha^2 \qquad (11)$$

Donde consideramos

$D_B = Coeficiente\ de\ difusión.$

$\alpha^2 = Distancia\ entre\ el\ plano\ del\ sitio\ intersticial\ de\ origen$

$y\ el\ plano\ del\ sitio\ intersticial\ al\ que\ se\ desea\ difundir.$

Al juntarlas se puede obtener que el coeficiente de difusión está expresado como se muestra en la ecuación (12)

$$D_B = [\frac{1}{6}\alpha^2 zvexp\frac{\Delta s_m}{RT}]\ \frac{-\Delta H_m}{RT} \qquad (12)$$

El único término que influye por causa de la temperatura es la entalpía de activación, por ende el coeficiente de difusión incrementa exponencialmente con la temperatura. Esta ecuación es coherente con las mediciones experimentales del coeficiente de difusión tanto en casos de difusión intersticial como en casos de difusión sustitucional. Sin embargo, cuando se trata de un proceso de difusión intersticial se ha comprobado que la entalpía de activación sólo depende de la energía necesaria para superar la barrera que existe al movimiento de los átomos intersticiales de un sitio a otro [2,5,6].

9. Aplicaciones industriales

Diversos procesos de manufactura se basan en la difusión en estado sólido; sin embargo, durante este segmento, se estudiarán dos procesos de difusión, siendo el endurecimiento superficial del acero por carburización con gas el primero de ellos y la introducción de impurezas en obleas de monocristales el segundo proceso.

Endurecimiento superficial del acero por carburización con gas

La importancia de este proceso radica en que, aquellas piezas de acero que han de estar en constante sometimiento a movimientos de rotación o deslizamiento, tales piezas como los engranajes y ejes, deben tener como cualidad primordial la resistencia al desgaste en su superficie al mismo tiempo que deben poseer una tenacidad favorecedora con el fin de resistir la fractura (Smith & Hashemi, 2006, 184). Algunas de estas piezas se aprecian en la *Figura 14*.

Usualmente, los componentes de acero carburizado son maquinados en primera instancia, bajo condiciones de fácil maquinado; después, la capa externa es endurecida mediante un tratamiento como la carburización, el cual se basa en el aumento de carbono en la superficie, a costa de la ductilidad del material. Estos aceros carburizados son de bajo contenido de carbono, es decir, se conforman de entre 0.10 y 0.25% de carbono. No obstante, su contenido de elementos aleantes en los aceros carburizados varía dependiendo de la aplicación que se le dará a la pieza [2].

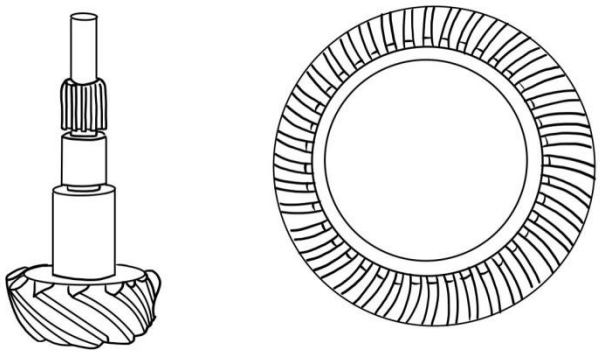

Figura 14. Componentes típicos de acero carburizado con gas.

En la carburización con gas, la primera parte del proceso consta de introducir los componentes de acero en un horno, mientras son expuestos a gases que contienen metano (CH_4) u otros hidrocarburos gaseosos a 927 °C.

Por ejemplo, en un caso donde se busca carburizar con gas unos engranajes en un horno se usa una mezcla de nitrógeno-metanol como atmósfera. El carbono de dicha atmósfera se difunde a través de la pieza, comenzando por su superficie y penetrando hasta tener un cierto espesor controlado a partir del tiempo que se deja la pieza dentro de esta atmósfera. Posterior a un tratamiento térmico, estos engranajes ahora poseen superficies endurecidas de alto contenido de carbono, lo cual se puede apreciar en las zonas ennegrecidas del engranaje mostrado en la *Figura 15 .*

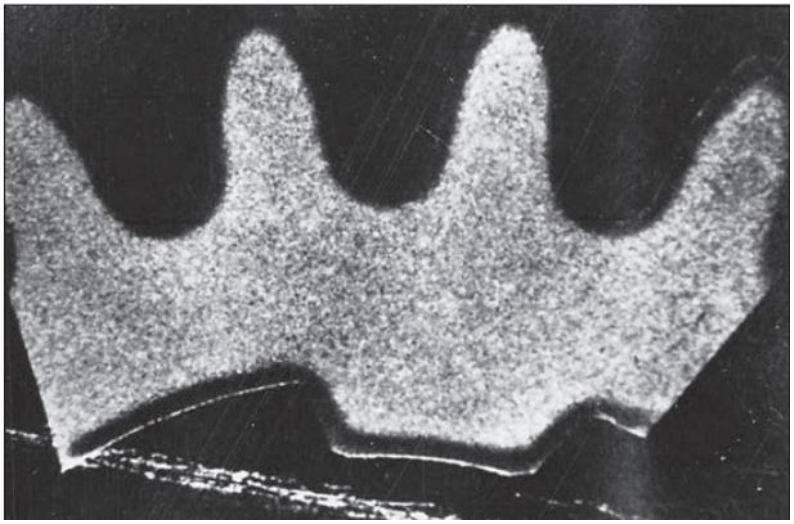

Figura 15. Macrosección del piñón de un engranaje, carburizado con nitrógeno-metanol.

Es importante recalcar que el tiempo de carburización está directamente relacionado con la penetración del contenido de carbono respecto a la superficie lo cual se puede observar en la *Figura 16* .

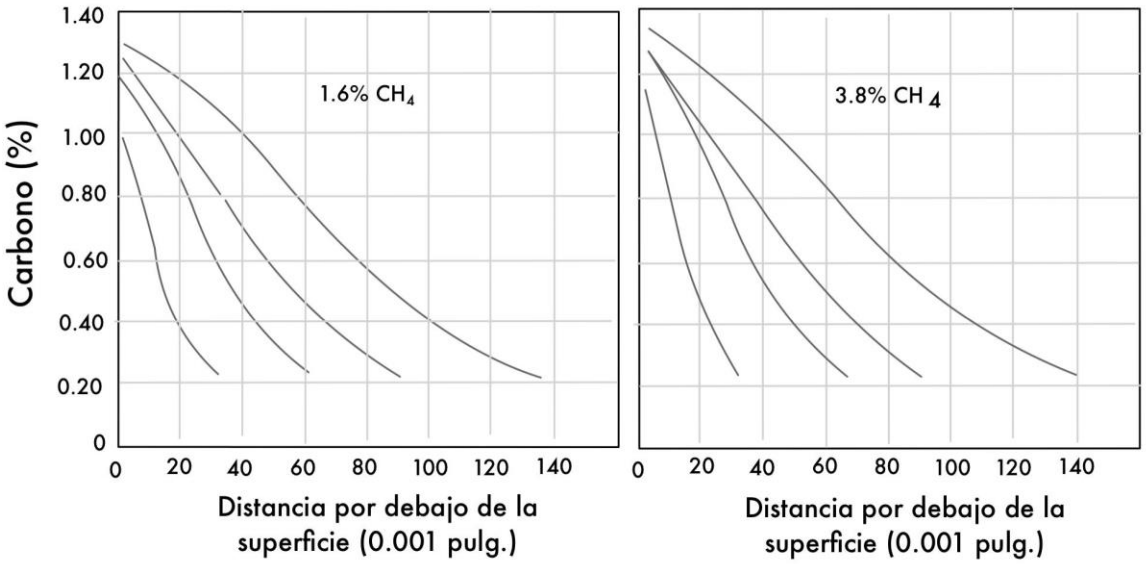

Figura 16. Gradientes de carbono en probetas de un acero 1022. Condiciones de carburización: 918 °C, en un gas con 20% CO y 40% H_2, con un añadido de 1.6 y 3.8 de metano, respectivamente [7].

Difusión de impurezas en obleas de silicio para circuitos integrados es un proceso de difusión es realizado con la finalidad de cambiar las características de conductividad eléctrica de los circuitos electrónicos integrados. El método aquí estudiado es aquel en el que el disco de silicio, se expone al vapor de una impureza a una cierta temperatura (aproximadamente 1100 °C) dentro de un horno de tubo de cuarzo. Es necesario que se proteja la parte de la superficie de silicio no expuesta a la difusión, es decir, que la impureza difusora solo actúe en aquellas secciones donde se desea el cambio en la conductividad eléctrica.

De manera similar al proceso de carburización, la concentración de las impurezas difundidas en la superficie disminuye conforme se aumenta la profundidad de penetración. Esto es, al cambiar el tiempo de difusión, cambiará la concentración de las impurezas respecto a la profundidad de penetración [2,8].

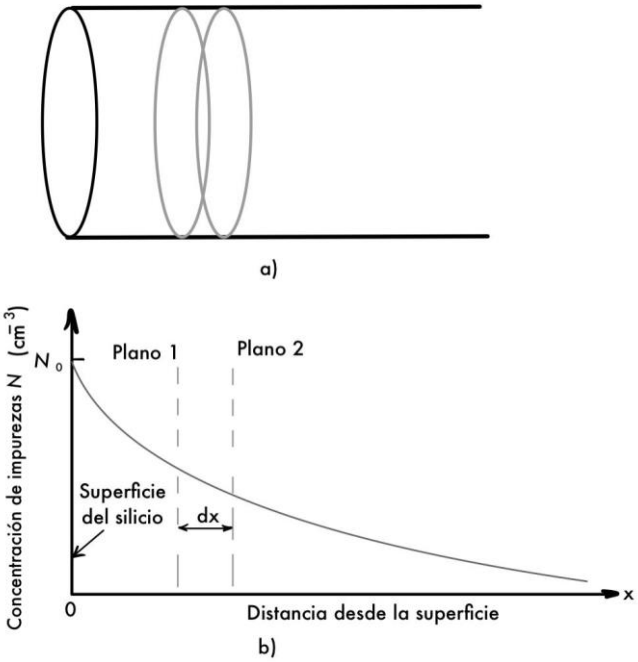

Figura 17. Difusión de impurezas en una oblea de silicio. a) Oblea de silicio con un espesor exagerado y con una concentración que disminuye desde la superficie (cara izquierda) hacia el interior. b) Distribución de impurezas graficada [8].

Cabe añadir que las profundidades típicas de la difusión en obleas de silicio son del orden de pocos micrómetros, siendo que el espesor de las obleas es de varios cientos de micrómetros.

10. Referencias

[1] M.A. Atwater, Materials and Manufacturing: An Introduction to how They Work and why it Matters, McGraw-Hill Education, 2019.

[2] W.F. Smith, J. Hashemi, G.N. Cázares, P.A. González-Caver, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, McGraw-Hill México, DF, 2006.

[3] K.R. Sharma, Transport Phenomena in Biomedical Engineering: Artifical organ Design and Development, and Tissue Engineering, McGraw-Hill Education, 2010.

[4] S.K. Basu, N. Kumar, Modelling and Simulation of Diffusive Processes: Methods and Applications, Springer Science & Business Media, 2014.

[5] D.A. Porter, K.E. Easterling, Phase transformations in metals and alloys (revised reprint), CRC press, 2009.

[6] D. Callister Jr William, Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, (2007).

[7] S.H. Treating, ASM Handbook W, (2013).

[8] J.N. Fordemwalt, R.M. Warner, Integrated circuits, design principles and fabrication, (1965).